

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

**АЛЬ ХАЙЯТ МОХАММЕД НАДІМ КАСІМ**

УДК 66.021.3:533.694.73(043.3)



**МАСООБМІННІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВИХРОВИХ ПРОТИТЕЧІЙНИХ АПАРАТІВ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання  
хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Склабінський Всеволод Іванович**,  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри процесів та обладнання  
хімічних і нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Якуба Олександр Родіонович**,  
Сумський національний аграрний університет,  
професор кафедри інженерних  
технологій харчових виробництв;

кандидат технічних наук, професор  
**Моїсєєв Віктор Федорович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри хімічної техніки  
та промислової екології.

Захист відбудеться «11» грудня о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 у Сумському державному університеті (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. Ц-204).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий «27» жовтня 2015 року.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради К 55.051.04



Л. Л. Гурець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** У нафтопереробній, хімічній та інших галузях промисловості для процесів поділу широко використовуються різноманітні конструкції масообмінного обладнання. Від ефективності роботи такого типу обладнання залежать якості самої продукції й енерговитрати на її виробництво.

Як масообмінні апарати, як правило, застосовуються традиційні конструкції обладнання барботажного і насадкового типів. Однак таке обладнання допускає стійку роботу лише при низьких швидкостях газової фази, які, як правило, не перевищують 2–2,5 м/с, що при високій продуктивності обумовлює або великі габаритні розміри апаратів, складність їх монтажу і транспортування, зниження ефективності через нерівномірність розподілу фаз у поперечному перерізі, або приводить до необхідності використання великої кількості паралельно працюючих апаратів.

Зазначених проблем можна уникнути при використанні масообмінної техніки, що працює в інтенсивних режимах розвиненої турбулентності з високими відносними швидкостями потоків газу та рідини і малим часом перебування оброблюваних фаз у робочій зоні апарата. До таких апаратів відносять апарати вихрового типу, які стійко працюють при швидкостях газу до 30 м/с, мають малі габаритні розміри і широкий спектр застосування.

У них можна значно прискорити масообмін за рахунок турбулізації течій, розпилення рідини на краплі малого розміру, що збільшує поверхню масообміну. Такий підхід дозволяє прискорити масообмін і знизити витрати на виробництво та експлуатацію обладнання.

Однак застосування вихрових апаратів для масообмінних процесів стримується відсутністю надійних науково обґрунтованих методик розрахунку.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному обґрунтуванню та експериментальним дослідженням вихрових потоків, вдосконаленню методів розрахунку процесів масопередачі у вихрових розпилювальних протитечієвих масообмінних апаратах та формулюванню рекомендацій із проектування та вибору параметрів роботи таких апаратів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт, запланованих на кафедрі «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» (ПОХНВ) Сумського державного університету і проводилася відповідно до теми: «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв із вихровими та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками»

(номер державної реєстрації 0110U002632).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягала в теоретичному та експериментальному дослідженні процесу масообміну в порожнистих протитечієвих вихрових апаратах, визначенні впливу гідродинамічних, конструктивних і технологічних параметрів на ефективність масообмінних процесів у вихровій масообмінній камері ВРПМА в режимі протитечієвого руху фаз і створенні на їх основі науково обґрунтованих методів розрахунку вихрових апаратів.

Для досягнення поставленої мети послідовно вирішувалися такі завдання:

- проведений аналіз відомих способів масообміну у вихрових потоках газу (пари) та рідини і розроблені методи впливу й формування сталого протитечієвого вихрового газорідинного потоку для інтенсифікації масообмінних процесів, що проходять у робочій області вихрової масообмінної камери;

- експериментально досліджені процеси масообміну в апаратах ВРПМА;

- проведена апробація та розроблені рекомендації з проектування та впровадження вихрових розпилювальних протитечієвих масообмінних апаратів у промислову практику з метою максимальної інтенсифікації масообміну в одиниці об'єму вихрової масообмінної камери ВРПМА;

- удосконалено інженерну методика розрахунку масообмінних характеристик ВРПМА та надано рекомендації щодо проектування.

**Об'єктом дослідження** є процес впливу конструктивних і режимних параметрів протитечієвого руху вихрових потоків газу та крапель рідини на ефективність масопередачі у вихрових апаратах.

**Предмет дослідження** – гідродинамічні та конструктивні параметри, що впливають на процес масообміну та його характеристики в апараті ВРПМА.

**Методи дослідження.** Математичне моделювання проводилося на базі класичних положень теорії масообміну. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендового зразка ВРПМА на базі використання математичного апарату планування експерименту та математичної статистики. У процесі експериментального дослідження використовували методи візуального спостереження, а також методи інструментальних вимірювань для визначення необхідних величин. Обробка результатів експериментів, порівняння з теоретичними моделями і визначення похибок проведені за допомогою методів математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у визначенні умов ефективної роботи ВРПМА на базі комплексних теоретичних, практичних та експериментальних досліджень, а саме:

- за результатами експериментальних досліджень вперше одержано масообмінні характеристики для різних режимів роботи вихрових розпилювальних протитечієвих масообмінних апаратів при вхідних швидкостях газу в вихрову камеру від 9,2 до 23,8 м/с;

- отримані емпіричні залежності, які дозволяють прогнозувати зміну ефективності масообмінних процесів від витрати газу в апараті у межах від 0,06 до 0,306 м<sup>3</sup>/с;

- вперше визначено вплив режимів роботи вихрових розпилювальних протитечієвих масообмінних апаратів зі співвідношеннями навантажень по рідкій та газовій фазах у межах 0,05–0,4 на інтенсивність бризкоунесення і вплив цього процесу на ефективність роботи апарата.

- уточнено критеріальну залежність, що описує масовіддачу між турбулентним потоком газу та краплями диспергованої рідини, яка дозволяє визначити вплив на гідродинамічні та масообмінні характеристики співвідношення основних геометричних розмірів (діаметра та висоти) та технологічних параметрів вихрової камери.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Обґрунтовано доцільність використання порожнистих вихрових апаратів із протитечією у зоні контакту для проведення процесів ректифікації, адсорбції, десорбції. Запропонована схема очищення технологічних газів від аміаку у виробництві соди із застосуванням порожнистих вихрових апаратів. Запропоновано схеми очищення промислових газових викидів від парів органічних розчинників, парів аміаку, сірчистого ангідриду, окислів азоту, двоокису вуглецю з використанням конструкцій ВРПМА.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблена й уточнена методика розрахунку параметрів ВРПМА, яка дозволяє розраховувати гідродинамічні, конструктивні та масообмінні характеристики і конструювати високоєфективні вихрові розпилювальні протитечієві масообмінні апарати.

Визначено шляхи підвищення ефективності масообміну в ВРПМА і запропоновано напрямки розвитку та удосконалення нових конструкцій ВРПМА.

Отримані наукові результати були використані при розрахунку вихрових розпилювачів протитечієвих масообмінних апаратів Центром дослідження і розвитку нафтової промисловості (PRDC, Ірак) (акт упровадження від 23.04.2013). Також наукові результати впроваджені для використання ДУ «НІОХІМ» (м. Харків) (акт упровадження від 25.06.2014).

**Особистий внесок здобувача** полягає в критичному аналізі літературних джерел, розробленні експериментального обладнання, проведенні фізичного та математичного моделювання досліджуваних

процесів, у виборі та апробації методик експериментальних досліджень масообмінних і гідродинамічних характеристик газорідного потоку в робочій камері вихрового ВРПМА, узагальненні отриманих результатів. Обговорення та аналіз отриманих результатів виконано разом із науковим керівником. Особистий внесок автора в наукових працях, опублікованих у співавторстві, наведено у списку праць за темою дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

- First Scientific Conference on Modern Technologies in Oil & Gas Refining, Iraq, Baghdad ( 25–27 april 2011);
- I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Хімічна технологія: наука та виробництво» (м. Шостка, Україна, 2011 р.);
- науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів інженерного факультету Сумського державного університету на секції «Хімічна технологія та інженерія» (2011, 2012 рр.);
- XV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Технологія – 2012» (м. Северодонецьк, Україна, 2012 р.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу» (м. Полтава, Україна, 2012 р.);
- 14-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя» (м. Запоріжжя, Україна, 2012 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових працях, із них 7 статей – у наукових журналах, у т. ч. 1 стаття – у спеціалізованому зарубіжному виданні, 6 публікацій тез доповідей у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 209 найменувань на 22 с., додатків на 8 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 217 сторінок, серед яких 7 таблиць, 57 ілюстрацій.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, їх практичне значення та наукову новизну, наведено відомості щодо апробації роботи, публікації результатів і подана загальна характеристика роботи.

У **першому розділі** на основі огляду літературних джерел та проведеного патентного пошуку проаналізовано сучасний стан і шляхи

розвитку вихрових розпилювальних протитечієвих масообмінних апаратів.

Під час аналізу роботи вихрових розпилювальних масообмінних апаратів були виділені основні гідродинамічні процеси, знання фізичної сутності яких дає можливість впливати на ефективність масообміну, та основні способи інтенсифікації масообмінних процесів у розпилювальних масообмінних апаратах.

Показано вплив конструкції розпилювачів і тангенціальних завихрювачів на гідродинаміку двофазних потоків у ВРПМА. Описано конструкцію існуючих ВРПМА і визначено їх недоліки.

Розглянуто сучасні підходи до опису гідродинамічного стану у вихрових апаратах і показано обмеження існуючих методів. Аналіз розрахункових залежностей показав, що істотним недоліком у методиках розрахунку є наявність малої кількості експериментальних даних щодо масообмінних характеристик ВРПМА, вузького діапазону застосування формул для розрахунку коефіцієнтів масопередачі та визначення геометричних параметрів вихрових масообмінних камер ВРПМА, виходячи із заданих умов і концентрацій розділюваних середовищ.

**У другому розділі** роботи проведено теоретичні дослідження масообмінних процесів у вихрових розпилювальних протитечієвих масообмінних апаратах (ВРПМА) і розроблено теоретичну методику розрахунку ефективності процесу масоперенесення в робочій зоні порожнистих вихрових апаратів з урахуванням основних закономірностей масопередачі через поверхню завислих крапель і прістінної рідинної плівки.

Робота вихрового масообмінного обладнання характеризується рядом гідродинамічних і геометричних факторів. Основна складність розрахунку коефіцієнтів масопередачі, інших параметрів, що характеризують ефективність роботи ВРПМА, теоретичним шляхом стикається з рядом труднощів; у зв'язку з цим за даними експериментальних досліджень зазвичай для визначення коефіцієнтів масовіддачі експериментальним шляхом отримують залежність типу

$$Nu = f(Re, Pe, \Gamma_1, \Gamma_2). \quad (1)$$

Основними гідродинамічними параметрами, що визначають інтенсивність масообмінних процесів у робочій вихровій масообмінній камері ВРПМА, є швидкості як у газовому, так і в рідинному потоках. Для виявлення переваг вихрового протитечієвого апарата ВРПМА доцільно застосовувати критерії, що характеризують ефективність використання одиниці об'єму масообмінної камери. Так, об'ємний коефіцієнт масопередачі дорівнює

$$K_v = GN_{eo} / V, \quad (2)$$

де  $N_{eo}$  – число одиниць перенесення, що визначається через середню логарифмічну рушійну силу процесу між початковою і

кінцевою різницею концентрацій.

В. В. Кафаров висунув ряд положень, які є базою теорії міжфазного масоперенесення, що ґрунтується на уявленнях про міжфазну турбулентність і свідчить про те, що вихори на міжфазній поверхні виникають при різних за величиною та напрямом швидкостях руху фазових потоків. Математичні моделі двофазних турбулентних течій поки відсутні, оскільки відсутні системи диференціальних рівнянь і рівнянь, що описують граничні умови, не лише для двофазних, але й для однофазних турбулентних потоків. Тому кількісний облік міжфазної турбулентності проводиться за допомогою результуючої безрозмірної величини – фактора гідродинамічного стану двофазної системи:

$$f = (\Delta P_{G-L} - \Delta P_G) / \Delta P_G, \quad (3)$$

з урахуванням цього чинника відомі рівняння масопередачі наберуть вигляду

$$\frac{kl}{D} = A_k \left( \frac{W \rho l}{\mu} \right)^{a_k} \left( \frac{\mu}{\rho D} \right)^{b_k} (1 + f). \quad (4)$$

Прийнята Кафаровим В. В. гіпотеза не має нічого спільного з відомим методом гідродинамічної (потрійної) аналогії. Отримане рівняння має глибокий фізичний зміст: перші три співмножники визначають масоперенесення в межах даної фази за рахунок молекулярної і вихрової дифузії, останній співмножник визначає масоперенесення за рахунок взаємодії потоків фаз. При  $f = 0$  рівняння перетворюється на рівняння масопередачі в однофазному потоці.

Масоперенесення від турбулентного потоку газу до міжфазової межі можна описати рівнянням

$$J = \beta_c (C \delta' - C^*) = -D_c \left( 1 + \frac{\varepsilon}{D_c} \right) \frac{\partial C}{\partial y_i}, \quad C = C^* \text{ при } y_i = 0, \quad C = C \delta' \text{ при } y_i = -\delta', \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт турбулентного обміну;  $y_i$  – поперечна координата.

У результаті розв'язання рівняння вигляду (5) із використанням різних модельних уявлень отримують залежності для розрахунку коефіцієнта тепло- або масовіддачі.

Розрахунок ефективності масоперенесення у вихрових апаратах можливий у тому разі, коли відомі значення локальних коефіцієнтів масовіддачі. Найбільш вдалим виразом для визначення масовіддачі до крапель рідини з боку газового потоку є рівняння, запропоноване Фреслінгом, та має такий вигляд:

$$Sh_2 = 2 + b Re^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (6)$$

де  $Sh$  – число Шервуда;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Sc$  – число Шмідта;  $\beta_y$  – коефіцієнт масовіддачі в газовій фазі;  $D_c$  – коефіцієнт



молекулярної дифузії;  $\nu_e$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості газу;  $b$  – коефіцієнт.

Можна розраховувати коефіцієнти масовіддачі до поверхні закрученої плівки рідини за відомою аналогією Кольборна:

$$\frac{Sh_e}{Re_e Sc_e} = \frac{\beta_y}{W} = \frac{\tau_0}{\rho_e W^2} Sc_e^{-2/3} = \frac{f}{2} Sc_e^{-2/3}, \quad (7)$$

де  $\tau_0$  – дотичне напруження на поверхні поділу фаз;  $f$  – коефіцієнт Фаннінга.

Дотичне напруження на поверхні поділу фаз може бути визначене за залежністю

$$\tau_0 = \rho_{ж} \left( \frac{a^+ v_{ж}}{a_0} \right)^2, \quad (8)$$

де  $a^+$  і  $a_0$  – відповідно безрозмірна і фактична середня товщини плівки рідини. Значення безрозмірної товщини плівки можуть бути визначені за такими залежностями:

$$Re_{ж} = 2a^+ \text{ при } a^+ \leq 5, \quad Re_{ж} = 4(12,5 - 8a^+ + 5a^+ \ln a^+) \text{ при } 5 \leq a^+ \leq 30,$$

$$Re_{ж} = 4(-64 + 3a^+ + 25a^+ \ln a^+), \text{ при } a^+ > 30. \quad (9)$$

Дотичне напруження на поверхні плівки також може бути визначене з експериментальних даних за гідравлічним опором при двофазній течії:

$$d\Delta p / \Delta l = A W_{np}^m q_{np}^n. \quad (10)$$

Порівняння результатів розрахунку за зазначеними залежностями з дослідними значеннями коефіцієнтів масовіддачі до поверхні плівки рідини засвідчують, що коефіцієнт адекватності цієї методики становить 0,96.

Дослідження масовіддачі від турбулентного потоку газу до плівки рідини виконані, головним чином, під час протитечісного руху фаз, і більшість дослідних даних узагальнюється критеріальним рівнянням, дуже подібним до критеріального рівняння тепловіддачі в одnofазному потоці:

$$Nu = A Re^m Pr^n, \quad A = 0,02-0,03; m = 0,75-0,83; n = 0,33-0,44. \quad (11)$$

При узагальненні залежності ефективності різних конструкцій вихрових пристроїв визначено, що масовіддача у газовій фазі в досліджених вихрових пристроях описується рівнянням

$$Nu = 0,0489 Re_e^{1,41} Pr^{0,3}, \quad (12)$$

де  $Re_\delta = W\delta / \nu$ ;  $W$  – швидкість газу в щілинах завихрювача;  $\nu$  – в'язкість газу.

У залежності (12) вплив рідкої фази враховано за допомогою величини стримувальної здатності пристрою за диспергованою рідкою фазою, величиною критерію  $Re_\delta$  одночасно наявні дві змінні величини  $W$  та  $\delta$ , причому величина  $\delta$  залежить від швидкості газу.

Тому рівняння (12) доцільно перетворити до вигляду

$$Nu_\delta = A Re_\delta^a Pr^b (\delta / d)^n, \quad (13)$$

де  $d$  являє собою діаметр вихрового контактного апарата.

Таким чином, залежність коефіцієнта масовіддачі в газі для різних масообмінних апаратів від швидкості газу узагальнюється одним рівнянням, що описує масовіддачу в газовій фазі для кожного з апаратів у діапазоні стійкої роботи конкретних контактних апаратів, вигляду

$$\beta = AW^{0.7} \quad (14)$$

$$\text{або } Nu = A Re^{0.7} Pr^{0.5}. \quad (15)$$

Вихровий потік газу у ВРПМА має градієнт швидкості за радіусом камери, що створює умови для збільшення коефіцієнта масопередачі.

Газова або парова фаза під час свого руху до центра відповідно до закону збереження моменту кількості обертального руху газового потоку збільшує тангенціальну складову повної швидкості:

$$m_i (d / dt) (r V_\phi) = 0, \quad (16)$$

де  $m_i$  і  $r$  – відповідно маса  $i$ -го обсягу і змінне значення за радіусом.

Розв'язком рівняння (16) є залежність зміни тангенціальної швидкості газового потоку вздовж радіуса вихрової масообмінної камери від периферії до центра:

$$V_\phi = V_{\phi_{\text{вх}}} (R_K / r), \quad (17)$$

де  $V_{\phi_{\text{вх}}}$  і  $R_K$  – відповідно швидкість газу у вхідних тангенціальних щілинах і радіус вихрової масообмінної камери.

Внаслідок зростання колової швидкості газу до центральної області виникають умови для розпилювання в цій зоні струменів рідини на краплі дуже маленького розміру. Такий висновок впливає з розгляду критерію Вебера:

$$We = (\rho_\Gamma V^2 d_K) / \sigma, \quad (18)$$

де  $\rho_\Gamma$  – густина газу;  $V$  – відносна швидкість руху рідини в газовому середовищі;  $d_K$  – діаметр краплі рідини;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

При досягненні  $We = (12-14)$  практично всі краплі дисперсного потоку піддаються дробленню. У процесі руху крапель у газовому потоці остання зазнає впливу аеродинамічних сил, унаслідок чого відбуваються зміна її форми і поділ на дрібні краплі. При досягненні в області розпилювання швидкостей газового потоку близько 80–100 м/с можна розпорошити рідину на краплі розміром 30–50 мкм, що приводить до інтенсифікації масообміну.

Параметри руху краплі рідини в газовому потоці з поперечним градієнтом колових швидкостей визначаються рівнянням

$$V_{\varphi} = \frac{V_{\varphi_1} R_1 - V_{\varphi_2} R_2}{R_1^{\text{Re}+2} - R_2^{\text{Re}+2}} r^{\text{Re}+1} + \frac{V_{\varphi_2} R_2 R_1^{\text{Re}+2} - V_{\varphi_1} R_1 R_2^{\text{Re}+2}}{R_1^{\text{Re}+2} - R_2^{\text{Re}+2}} r^{-1}, \quad (19)$$

де  $V_{\varphi_1} = V_{BX}$ ,  $\text{Re} = \frac{V_{R_1} R_1}{\varepsilon^*}$ ,  $R_2$  і  $V_{\varphi_2}$  – відповідно радіус патрубку відведення газу з вихрової камери і колова швидкість газу на цьому радіусі;  $\varepsilon^*$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Вплив такого поперечного градієнта швидкостей газового потоку приводить до того, що по різні боки краплі уздовж радіуса вихрової камери її обтікає газовий потік із різними швидкостями.

Така взаємодія прискорює внутрішні циркуляційні струми в краплях. Подібний аналіз можна провести виходячи із залежності між величиною  $dq$ , що характеризує величину радіальних струмів у краплі, та величиною  $a_1$ , яка характеризує градієнт колової швидкості, тобто різницю колових швидкостей газу по обидва боки краплі

$$V_{\varphi} \approx \left( \frac{V_{\varphi_1} - V_{\varphi_2}}{2R} \right) r + V_{\varphi_2} \approx a_1 r + a_2, \quad \text{що має нелінійний характер:} \quad (20)$$

$$dq = \left( 16\pi\psi\rho_r R^3 \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} R a_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) - \frac{8}{3} \pi \mu_r \omega_k \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3 - \frac{8}{15} \rho \pi R^3 \frac{d\omega}{dt} \right) / (\omega \rho r^2 \cos^2 \theta),$$

де  $R$  – радіус краплі;  $\psi$  – коефіцієнт опору;  $\rho_r$  і  $\mu_r$  – густина і динамічна в'язкість газу;  $\rho$  – поточне значення радіуса у сферичних координатах;  $\delta$  – товщина межового шару газу на краплі;  $\omega$  – швидкість обертання краплі.

Це рівняння підтверджує залежність між поперечним градієнтом швидкості газу у вихровій камері, інтенсивністю радіальних струмів у краплі та інтенсивністю масообмінних процесів. Величину суми моментів  $\sum M_z$  від сили аеродинамічного впливу на краплю

$$M = 16\pi\psi\rho_r R^3 \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} R a_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) \text{ і сил в'язкого тертя газу по поверхні}$$

краплі  $M_c = 2\mu_r \omega_k \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3 \int_0^\pi \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta d\varphi = \frac{8}{3} \pi \mu_r \omega_k \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3$  можна визначити

враховуючи наявність дотичних напружень на поверхні краплі при її обертанні:

$$\sum M_z = M - M_c = 16\pi\varphi\rho_1 R^3 \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} Ra_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) - \frac{8}{3} \pi \mu_r \omega_k \left( 1 + \frac{R}{\delta} \right) R^3. \quad (21)$$

У свою чергу, похідна  $dp/dt$  є радіальною складовою швидкості руху рідини у краплі  $W_r$  і характеризує швидкість перенесення речовини всередині краплі, тобто інтенсивність конвективного масообміну, що, в свою чергу, збільшує інтенсивність відновлення поверхні краплі, яка є поверхнею масообміну, і прискорює тепломасообмінні процеси.

Якщо врахувати, що число одиниць перенесення в рідкій фазі дорівнює  $N = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\beta(x_p - x)} = -2 \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \frac{ds}{\rho dq}$ , і поверхнею масопередачі є поверхня

краплі, то

$$N = \frac{R\omega}{6 \left[ \frac{\mu_r \omega_k}{3} \left( 1 + \frac{5}{8} \right) + \frac{\rho}{15} R^2 \frac{d\omega}{dt} - 2\psi\rho_r \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} Ra_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right) \right]}. \quad (22)$$

У поперечному напрямку руху краплі (градієнт швидкості ( $V_{\varphi_1} = V_{\varphi_2}$ ,  $a_1 = 0$ )) число одиниць перенесення визначається таким математичним виразом:

$$N^* = \frac{R\omega}{6 \left[ \frac{\mu_r \omega_k}{3} \left( 1 + \frac{5}{8} \right) + \frac{\rho}{15} R^2 \frac{d\omega}{dt} - 2\psi\rho_r \frac{a_2^2}{32} \right]}. \quad (23)$$

При порівнянні отриманих формул стає очевидним, що  $N > N^*$  через нерівність знаменників.

Наявність поперечного градієнта швидкості газу приводить до інтенсифікації внутрішніх циркуляційних струмів, які, у свою чергу, збільшують інтенсивність масообміну і число одиниць перенесення

$$\frac{N}{N^*} = \frac{\frac{\mu_r \omega_k}{3} \left( 1 + \frac{5}{8} \right) + \frac{\rho}{15} R^2 \frac{d\omega}{dt} - 2\psi\rho_r \frac{a_2^2}{32}}{\frac{\mu_r \omega_k}{3} \left( 1 + \frac{5}{8} \right) + \frac{\rho}{15} R^2 \frac{d\omega}{dt} - 2\psi\rho_r \left( \frac{7}{128} R^2 a_1^2 + \frac{5}{8} Ra_1 a_2 + \frac{a_2^2}{32} \right)} > 1. \quad (24)$$

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик ВРІМА, а також загальну методику та основні методи досліджень.

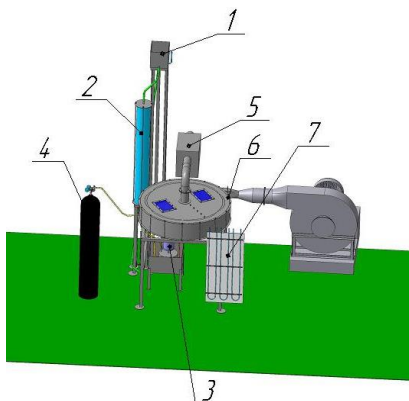


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда для дослідження масообмінних характеристик ВРПМА:

- 1 – напірний бак;
- 2 – насадкова колона;
- 3 – насос; 4 – балон із CO<sub>2</sub>;
- 5 – брызкоуловлювач;
- 6 – масообмінна камера апарата;
- 7 – блок U-подібних манометрів;
- 8 – газодувки

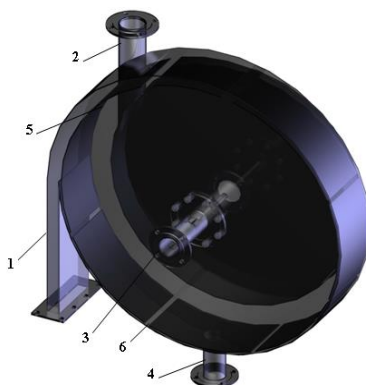


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд ВРПМА:

- 1 – тангенціальне введення газу (пари);
- 2 – відведення газу (пари);
- 3 – введення рідини в розпилювач;
- 4 – відведення рідини з апарата;
- 5 – лопатки (завихрювач) для введення газу в окружому напрямку у вихрову масообмінну камеру;
- 6 – щілини для відведення рідини з вихрової масообмінної камери

Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень на лабораторній установці та з допомогою математичного апарату планування експерименту.

Для проведення експериментальних досліджень у лабораторії кафедри ПОХНВ (СумДУ) був створений лабораторний стенд (рис. 1) для дослідження гідродинамічних і масообмінних характеристик роботи ВРПМА, конструкція якого наведена на рис. 2.

Експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик ВРПМА проводилися на системі повітря – вода. Під час роботи лабораторного стенда регулювалися витрати газу та рідини і була можливість задавати різне співвідношення фаз. Рідину із системи водопостачання подавали в напірний бак 1 і під дією сили тяжіння вона надходила в масообмінну камеру 6, де розпилювалася за допомогою форсунки, конструкція якої показана на рис. 3. Повітря із навколишнього середовища через повітрярозбірник усмоктувалося за рахунок розрядження, створюваного радіальним вентилятором високого тиску 8. Уведення повітря в апарат здійснювалося за допомогою тангенціального патрубку. Розпорошена рідина взаємодіяла з повітрям у масообмінній

камері апарата.

Відведення повітря з апарата здійснювалося через патрубок у верхній торцевій кришці. Витрата повітря та рідини регулювалася згідно з планом експерименту. Заміряли перепад тиску й бризковинесення під час роботи апарата. Для визначення бризковинесення на виході з масообмінної камери був установлений бризкоуловлювач 5 гравітаційного типу, в якому відбувалося розділення газорідинної суміші за рахунок зменшення швидкості руху газу і дії сили тяжіння на краплі.

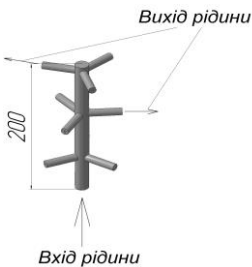


Рисунок 3 – Схема розпилювального пристрою

Принцип роботи вихрової камери полягав у такому: через 6 щілин у корпусі апарата тангенціально вводиться газова фаза, яка під час просування до центра збільшує швидкість руху й досягає значення 100 м/с.

Протитечією до газової фази в камеру через розпилювач 3 вводиться рідина, яка за рахунок енергії газового потоку рухається від центра до периферії.

При цьому газ у радіальному напрямку рухається від периферії до центра вихрової робочої камери, а краплі під дією відцентрових сил у радіальному напрямку від центра до периферії цієї масообмінної камери, де потім осідають на стінках і відводиться з апарата у вигляді рідини.

Результати експерименту з визначення гідравлічного опору апарата наведені на рис. 4 і показують монотонне зниження гідравлічного опору при збільшенні співвідношення навантажень за фазами в дослідженому діапазоні.

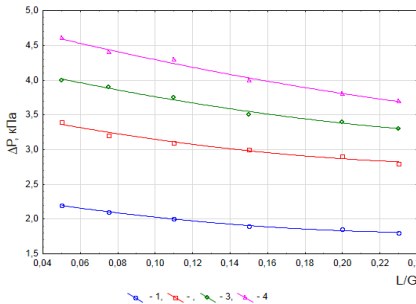


Рисунок 4 – Залежність гідравлічного опору масообмінної камери від навантаження за фазами при різних початкових швидкостях газу:

$V_{\text{вх}}$  (м/с): 1 –  $V_{\text{вх}} = 7,7$  м/с;

2 –  $V_{\text{вх}} = 14,1$  м/с; 3 –  $V_{\text{вх}} = 21,8$  м/с;

4 –  $V_{\text{вх}} = 24,35$  м/с;  $D_k = 1100$  мм;

$L$  – навантаження за рідкою фазою (кг/с);  $G$  – навантаження за газовою фазою (кг/с)

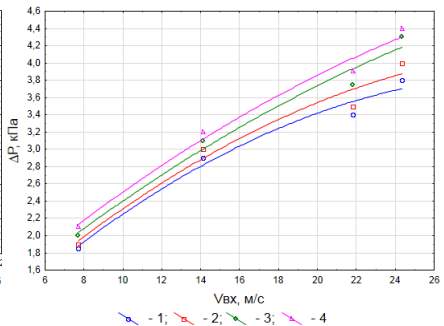


Рисунок 5 – Залежність гідравлічного опору від початкової швидкості газу на вході в апарат при різному співвідношенні навантажень за фазами:

1 –  $L/G = 0,2$ ; 2 –  $L/G = 0,15$ ;

3 –  $L/G = 0,11$ ; 4 –  $L/G = 0,75$

Таке зниження гідравлічного опору, ймовірно, підтверджує зроблені раніше припущення про залучення рідини в обертальний рух за рахунок енергії газового потоку, а також про зниження величини гідравлічного опору зі змочуванням внутрішніх елементів і поверхонь апарата. Відсутність зламів на кривих рис. 4 свідчить про те, що для розробленої конструкції вихрового апарата, не характерний яскраво виражений перехідний режим. Нова конструкція може стійко працювати в широких діапазонах навантажень як щодо газу, так і щодо рідини.

На рисунку 5 показана залежність гідравлічного опору від початкової швидкості газу на вході в апарат. Рисунок ілюструє монотонне зростання гідравлічного опору зі зростанням початкової швидкості й зниженням навантаження за фазами.

Експериментально визначалося бризковинесення. Для цього проведено замір кількості рідини, що входить в апарат і виходить із нього. У ході дослідження роботи апарата змінювалася витрата рідини (від 0,000011 до 0,000031 м<sup>3</sup>/с) і газу (0,06 до 0,306 м<sup>3</sup>/с), що дозволило побачити результати при різних співвідношеннях газу та рідини. Усі дослідження проводилися при турбулентному режимі руху газу ( $Re > 10000$ ).

Результати досліджень бризковинесення узагальнені у вигляді графічних залежностей, показаних на рис. 6. Із графіків на рис. 6 бачимо, що при зміні навантажень за фазами ( $L/G$ ) кожна із

залежностей має яскраво виражений максимум винесення рідини, потім при збільшенні показника  $L/G$  бризковинесення знижується до величини порядку 0,0015 кг/с.

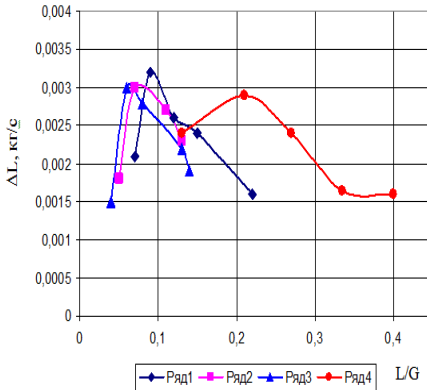


Рисунок 6 – Зміна бризковинесення рідини залежно від співвідношення навантажень за фазами при різній початковій швидкості газу у вхідних щілинах  $V_{вх}$  (м/с):

- 1 –  $V_{вх} = 14,1$  м/с;
- 2 –  $V_{вх} = 21,8$  м/с; 3 –  $V_{вх} = 24,35$  м/с;
- 4 –  $V_{вх} = 7,7$  м/с;  $D_k = 1100$  мм;
- $L$  – навантаження за рідкою фазою (кг/с);
- $G$  – за газовою фазою (кг/с)

Величина бризковинесення характеризує роботу вихрової камери. Так, якщо бризковинесення підвищене, то це свідчить про зрив роботи ВРПМА, оскільки аеродинамічні сили, що діють на краплі, у цьому разі переважають над відцентровими.

Рідина захоплюється газом до центра ВРПМА. Порушується протитечійний рух уздовж радіуса вихрової масообмінної камери крапель і газу. Величина бризковинесення також залежить від співвідношення навантажень за фазами та конструкції й схеми розміщення розпилювача.

Таким чином, як напрямок введення струменів рідини, що піддаються розпилюванню за рахунок енергії газового потоку, так і величини радіальних швидкостей і колових складових швидкості струменів рідини необхідно враховувати під час аналізу гідродинаміки газокраплинного вихрового потоку в робочій камері ВРПМА. Змінюючи ці величини, можна також керувати газокраплинним потоком і впливати на ефективність роботи ВРПМА в цілому.

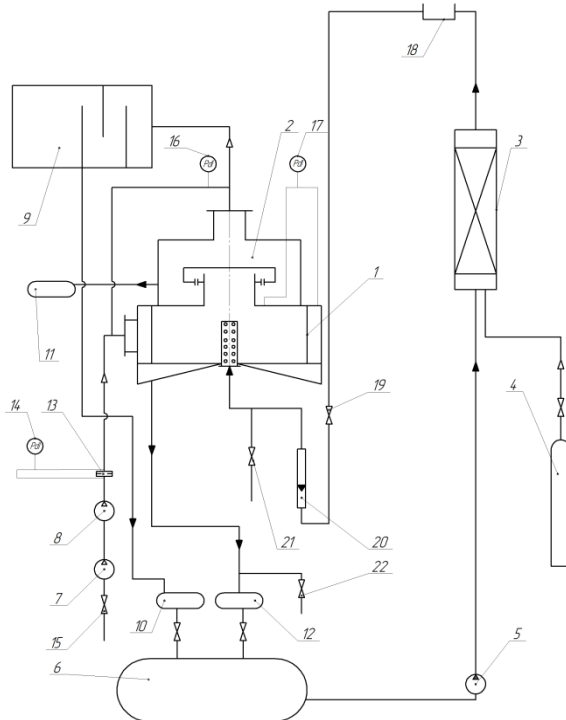
У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень кінетичних закономірностей масовіддачі в рідкій фазі у ВРПМА, що проводили при десорбції важкорозчинного  $\text{CO}_2$  з води потоком повітря. Експерименти з дослідження масовіддачі проводили на установці, схема якої наведена на рис. 7.

Для вивчення процесу ректифікації у ВРПМА на основі даних із літературних джерел запропоновано рекомендації для аналізу характеристик й ефективності роботи ВРПМА в таких процесах.



Результати дослідження масовіддачі показали високу ефективність апаратів. Проведені дослідження дозволили також виявити залежність між бризковинесенням та зниженням ефективності ВРПМА.

Для всіх режимів зниження ефективності масовіддачі збігається зі збільшенням бризковинесення (рис. 6, 8). Збільшення винесеної рідини пояснюється особливостями конструкції апаратів та їх гідродинаміки.



Експериментальна установка складається з:

- 1 – ВРПМА;
- 2 – сепаратора;
- 3 – абсорбційної насадкової колони;
- 4 – балона із  $\text{CO}_2$ ;
- 5 – насоса;
- 6 – ємності рідини;
- 7 і 8 – вентиляторів високого тиску;
- 9 – бризкоуловлювача;
- 10, 11, 12 – ємностей для збору рідини;
- 13 і 14 – витратоміра повітря змінного перепаду тиску й диференціального манометра відповідно;
- 15 – вентиля;
- 16, 17 – манометрів;
- 18 – дегазатора;
- 19, 20, 22 – клапанів;
- 20 – ротаметра.

Рисунок 7 – Схема експериментальної установки для дослідження процесів масовіддачі

На краплі діють великі відцентрові сили, завдяки чому рідина «пролітає» небезпечну зону осьових швидкостей газу. Далі зі збільшенням навантаження за рідиною швидкості газу знижуються, що позначається на силовому впливі газу на краплі й приводить до деякого збільшення бризковинесення.

На рисунках 9, 10 наведено графічні залежності ступеня вилучення від швидкості газу у вхідних тангенціальних щілинах при різних швидкостях рідини в отворах розпилювача для апаратів діаметрами 400 і 600 мм.

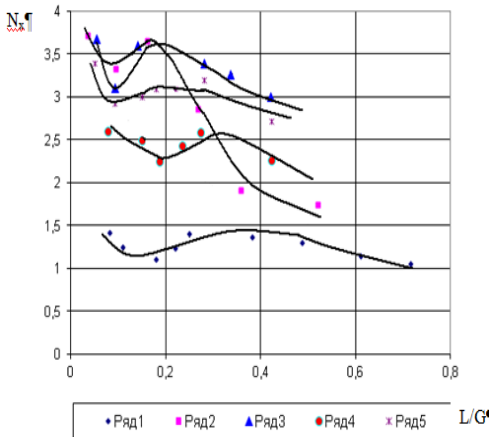


Рисунок 8 – Залежність числа одиниць перенесення від співвідношення навантажень за фазами при різних швидкості газу у вхідних щілинах: 1 –  $V_{вх} = 9,2$  м/с; 2 –  $V_{вх} = 12,8$  м/с; 3 –  $V_{вх} = 15,6$  м/с; 4 –  $V_{вх} = 20$  м/с; 5 –  $V_{вх} = 23,8$  м/с

трьох інших типів масообмінних пристроїв, сітчастої, клапанної та ковпачкової тарілок. Бачимо, що значення об'ємного коефіцієнта для ВРПМА на порядок вище, ніж у традиційному тарілчастому обладнанні.

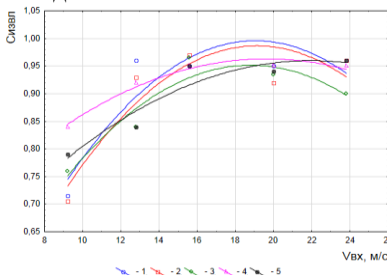


Рисунок 9 – Залежність ступеня вилучення від швидкості газу у вхідних щілинах при різних швидкостях рідини в отворах розпилювача ( $D_k = 400$  мм): 1 –  $W_{вх} = 1,275$  м/с; 2 –  $W_{вх} = 2,765$  м/с; 3 –  $W_{вх} = 5,72$  м/с; 4 –  $W_{вх} = 7,2$  м/с; 5 –  $W_{вх} = 8,7$  м/с

Залежності, одержані внаслідок обробки експериментальних даних, дозволяють визначити масообмінні характеристики і розміри апарата.

На рисунку 11 наведена експериментальна залежність зміни об'ємного коефіцієнта масопередачі від режиму роботи ВРПМА. Для оцінювання величини коефіцієнта на графіку показані залежності зміни об'ємного коефіцієнта масопередачі для

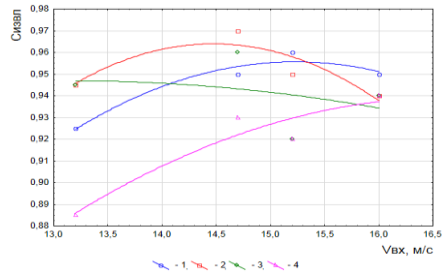


Рисунок 10 – Залежність ступеня вилучення від швидкості газу у вхідних щілинах при різних швидкостях рідини в отворах розпилювача ( $D_k = 600$  мм): 1 –  $W_{вх} = 13,2$  м/с; 2 –  $W_{вх} = 14,7$  м/с; 3 –  $W_{вх} = 15,2$  м/с; 4 –  $W_{вх} = 16$  м/с

Графічна залежність питомого опору, що припадає на один теоретичний ступінь зміни концентрації, наведена на рис. 12.

Використання протитечієвих вихрових потоків приводить до інтенсифікації масообміну, що дозволяє досягти 3–3,5 теоретичного ступеня зміни концентрації в одному ступені розпилення. Питомий гідравлічний опір (рис. 12) для ВРПМА менший за аналогічні значення для деяких типів тарілок і порівняно з величиною питомого опору в області оптимуму для тарілок, які мають більш економічні показники. Заміна кількох тарілок одним апаратом і зменшення кількості флегми, що подається на зрошення, приведе до зменшення енерговитрат під час експлуатації.

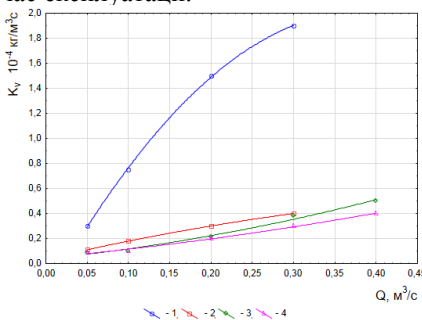


Рисунок 11 – Залежність об'ємного коефіцієнта масопередачі від навантаження за газом для різних масообмінних пристроїв:

- 1 – ВРПМА; 2 – сітчастої тарілки;
- 3 – копачкової тарілки;
- 4 – клапанної тарілки

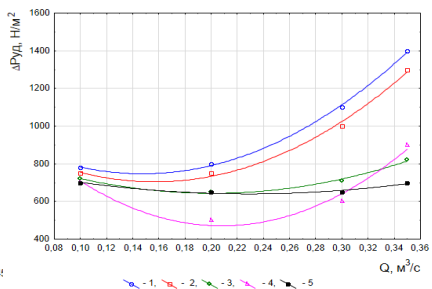


Рисунок 12 – Зміна питомого опору на один теоретичний ступінь зміни концентрації (1 – типу «Юніфлакс»; 2 – із S-подібних елементів; 3 – протитечієво-клапанна; 4 – сітчаста з відбійними елементами; 5 – ВРПМА)

У **п'ятому розділі** визначені шляхи підвищення ефективності масообміну в ВРПМА і запропоновані напрямки розвитку та удосконалення нових конструкцій ВРПМА. Удосконаленню інженерну методику проектування і розрахунку основних геометричних параметрів масообмінних камер ВРПМА і масообмінних характеристик двофазного потоку в апараті.

У **шостому розділі** роботи в результаті проведених досліджень були експериментально визначені параметри роботи вихрового розпилювального апарата при абсорбції аміаку. Визначено ефективність абсорбції аміаку у вихровому розпилювальному протитечієвому масообмінному апараті.

Показано, що ефективність апарата практично не залежить від концентрації аміаку в газі і досягає 99,9 % (рис. 13). Ефективність роботи вихрового апарата збільшується зі збільшенням витрати рідини й знаходиться в діапазоні від 80 до 99,9 % (рис. 14). Зі збільшенням

відносного навантаження апарата його ефективність зростає. Проте зростання навантаження за газом знижує ефективність роботи вихрового апарата.

Унаслідок впровадження результатів дослідження в промислову практику підвищиться ефективність роботи ПГКЛ-2 у виробництві кальцинованої соди. На основі аналізу результатів досліджень розроблені та передані для промислового використання рекомендації щодо проектування нових зразків масообмінного устаткування і впровадження у виробництво ВРПМА в процеси очищення газів содової промисловості.

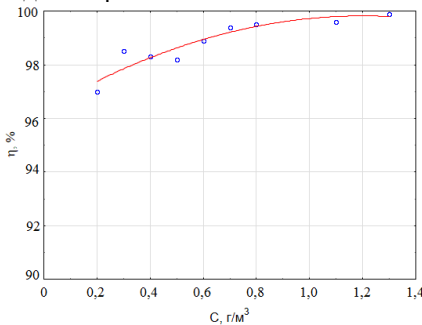


Рисунок 13 — Залежність ступеня газоочищення від концентрації аміаку в газі

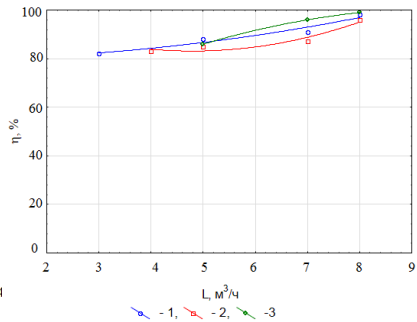


Рисунок 14 — Залежність ККД вихрового апарата при абсорбції аміаку від витрати рідини. Витрата газу:

1 – 750 м³/ч;

2 – 950 м³/ч; 3 – 1150 м³/ч

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі ряду теоретичних і експериментальних досліджень та узагальнень вирішене важливе науково-практичне завдання, яке полягає у підвищенні ефективності масообмінних процесів, що проходять при очищенні відхідних газів содового виробництва, а також аналізу факторів та умов, що впливають на масообмінні характеристики ВРПМА.

Були вирішені такі завдання:

1. У результаті аналізу відомих конструкцій апаратів для очищення промислових газових викидів і показників їх роботи був зроблений висновок про те, що для очищення великотоннажних газових викидів промислових підприємств перспективними є вихрові розпилювальчі протитечійні масообмінні апарати (ВРПМА), які забезпечують більшу питому продуктивність, мають малі габарити і низьку металоємність.

2. Розроблена теоретична методика розрахунку ефективності процесу масоперенесення в робочій зоні порожнистих вихрових апаратів з урахуванням основних закономірностей масопередачі через поверхню завислих крапель і пристінної рідинної плівки.

3. На основі аналізу закономірностей кінетики хемосорбційних процесів, що проходять при очищенні газових викидів від аміаку розсоллом, показано, що швидкість хемосорбції  $\text{NH}_3$  збільшується при зменшенні температури, підвищенні ступеня турбулізації газу, збільшенні кратності оновлення поверхні контакту фаз, скороченні бризковинесення. Відмінною особливістю хемосорбційних процесів, що проходять при поглинанні  $\text{CO}_2$  з газових викидів амонізованим розсоллом, є те, що для збільшення швидкості процесу хемосорбції  $\text{CO}_2$  необхідно збільшувати концентрацію  $\text{NH}_3$  в амонізованому розсолі при високій площі і високій кратності оновлення поверхні контакту фаз. Це дозволяє науково обґрунтувати шляхи інтенсифікації поглинання з відхідних газів  $\text{NH}_3$  і  $\text{CO}_2$  та розробити ефективні способи і апарати, що дозволяють забезпечити збільшення екологічної безпеки содового виробництва.

4. Експериментально досліджено поведінку газового потоку при зміні режимних параметрів (витрати газу та рідини) і визначено гідравлічний опір апарата, який в 1,5–2 рази менший, ніж у традиційному масообмінному обладнанні, та параметри бризковинесення, що для такої конструкції апарата менше у 2–3 рази, ніж у аналогічних апаратах. Отримані експериментальні результати оброблені у вигляді залежностей від швидкості газу та щільності зрошення.

5. Отримані експериментальні масообмінні характеристики ВРПМА у процесах абсорбції (десорбції) і ректифікації модельних сумішей на різних режимних параметрах. Об'ємний коефіцієнт масопередачі у ВРПМА в 2–4 рази більший, ніж у колонних апаратах.

6. Визначено шляхи підвищення ефективності масообміну і запропоновано напрямки розвитку й удосконалення нових конструкцій ВРПМА.

7. Розроблена конструкція розпилювача для ВРПМА з урахуванням досягнення найбільш ефективного розпилювання рідини і мінімального бризковинесення.

8. Проведено порівняння ефективності ВРПМА з іншими конструкціями обладнання для проведення масообмінних процесів із використанням одержаних даних; визначено діапазон ефективної роботи апарата та сформульовано умови, за яких використання ВРПМА є доцільним.

9. Удосконалено інженерну методику проектування та розрахунку основних геометричних параметрів масообмінних камер ВРПМА і масообмінних характеристик двофазного вихрового потоку в апараті.

10. На основі аналізу результатів досліджень розроблені й передані для промислового використання рекомендації щодо проектування нових зразків масообмінного устаткування і впровадження у виробництво ВРПМА в процеси очищення газів содової промисловості.

11. Розроблені технологічні схеми з використанням ВРПМА для очищення промислових газових викидів від парів органічних розчинників, парів аміаку, сірчистого ангідриду, окислів азоту, двоокису вуглецю. Показано, що ефективність розроблених вихрових апаратів при очищенні газових викидів від зазначених компонентів може досягати 99 %.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у фахових виданнях

1. Склабинский В. И. Вихревые распыливающие противоточные массообменные аппараты. Интенсификация массообмена / В. И. Склабинский, Н. К. Аль Хайят Мохаммед // Хімічна промисловість України. – 2010. – № 6. – С. 11–14.

*(Здобувачем виконаний аналіз відомих конструкцій вихрових апаратів та показані шляхи інтенсифікації процесів масообміну).*

2. Склабинский В. И. Влияние гидродинамических параметров газового потока на интенсивность внутренних циркуляционных токов в каплях жидкости в массообменной камере распыливающего противоточного аппарата / В. И. Склабинский, Н. А. Кочергин, Н. К. Аль Хайят Мохаммед // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – № 2. – С. 29–35.

*(Здобувачем проаналізовані параметри газового потоку та показаний їх вплив на циркуляційні потоки у краплях рідини).*

3. Sklabinsky V. I. The Characteristics of Vortex Spray Countercurrent Mass Exchang Device (vscmed) / V. I. Sklabinsky, Abdullah Jalal Mohammed, Mohammed Nahdim Gasim // Engineering & Technology Journal. – 2011. – № 15, Vol. 29. – P. 3211–3223.

*(Проведена експериментальна перевірка теоретичних положень та наведені результати дослідження ефективності роботи ВРПМА).*

4. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Экспериментальное определение характеристик вихревых распыливающих противоточных массообменных аппаратов (ВРПМА) / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, Д. М. Мохаммед Абдуллах, Н. Кочергин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 15 (186), Ч. 2. – С. 90–93.

*(Досліджена залежність інтенсивності бризковинесення від зміни режиму роботи ВРПМА).*

5. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Розрахунок стабільної роботи вихрового розпилювального протитечійного масообмінного апарата (ВРПМА) залежно від гідродинамічних характеристик газокраплинного потоку / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, Д. М. Мохаммед Абдуллах // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 4/1 (18). – С. 53–56.

*(Здобувачем обрана методика вибору стійких режимів роботи ВРПМА).*

6. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Экспериментальное исследование массообменных характеристик вихревых распыливающих массообменных аппаратов / Н. К. Аль Хайят Мохаммед // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/7 (70). – С. 46–50.

*(Здобувачем обрана методика проведення експерименту, отримані результати та надані рекомендації щодо подальших досліджень ВРПМА).*

7. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Санитарная очистка газовых выбросов от аммиака в производстве кальцинированной соды / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, В. И. Склабинский // Technology audit and production reserves. – 2014. – № 6/1 (20). – С. 49–54.

*(Проведені дослідження ефективності роботи вихрового розпилювального протитечійного масообмінного апарата при абсорбції аміаку, а також проаналізовані отримані дані та надані рекомендації щодо впровадження результатів у промислову практику).*

### **Тези виступів на конференціях**

8. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Определение оптимального размера капель в ВРПМА / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, Д. М. Мохаммед Абдуллах // Международная научно-техническая конференция «Технология – 2012», 6–7 апреля 2012 г. – С. 171–172.

*(Наведені результати розрахунку розміру крапель у робочій камері ВРПМА).*

9. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Рекомендации по внедрению ВРПМА в нефтегазовую промышленность / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, Д. М. Мохаммед Абдуллах // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу», м. Полтава, 8–9 вересня 2012 р. – Полтава, 2012. – С. 45–46.

*(Наведені рекомендації щодо впровадження розробленого апарата у нафтогазову промисловість).*

10. Sklabinsky V. I. The assessment of the processing chamber radial dimensions of vortex spray countercurrent mass exchange device / V. I. Sklabinsky, Mohammed Nahdim Gasim, Abdullah Jalal

Mohammed // First Scientific Conference on Modern Technologies in Oil @ Gas Refining, Iraq, Baghdad. – Vol. 9. – P. 24.

*(Наведена методика розрахунку розмірів масообмінної камери ВРПМА).*

11. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Массообменные характеристики вихревого распыливающего противоточного массообменного аппарата (ВРПМА) / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, В. И. Склабинский // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18–22 квітня 2011 року / ред. кол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2011. – Ч. 1. – С. 119.

*(Здобувачем експериментально досліджені параметри масообміну у вихровому протитечійному розпилювальному апараті, проведений аналіз одержаних даних та сформульовані основні висновки).*

12. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Определение межфазной поверхности в рабочей камере вихревого распыливающего противоточного массообменного аппарата (ВРПМА) / Н. К. Аль Хайят Мохаммед // I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Хімічна технологія: наука та виробництво», м. Шостка, 7–9 листопада 2011 року. – Суми : СумДУ, 2011. – С. 63.

*(Здобувачем наведені методика розрахунку коефіцієнта масопередачі та уточнювальний розрахунок гідродинамічних характеристик ВРПМА).*

13. Аль Хайят Мохаммед Н. К. Зависимость поверхности массообмена от гидродинамики потоков рабочей камере вихревого распыливающего противоточного массообменного аппарата (ВРПМА) / Н. К. Аль Хайят Мохаммед, В. И. Склабинский // 14-та Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційний потенціал української науки – ХХІ сторіччя». – Запоріжжя : Вид-во ПГА, 2012. – С. 63–66.

*(Здобувачем подано результати досліджень ефективності роботи вихрового розпилювального протитечійного масообмінного апарата).*

## АННОТАЦІЯ

**Аль Хайят Мохаммед Н. К. Масообмінні характеристики вихрових протитечійних апаратів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет, МОН України, Суми, 2015.

Метою дисертаційної роботи є теоретичне та експериментальне



дослідження процесу масообміну в порожнистих протитечійних вихрових апаратах, визначення впливу гідродинамічних, конструктивних і технологічних параметрів на ефективність масообмінних процесів у вихровій масообмінній камері ВРПМА в режимі протитечійного руху фаз і створення на їх основі науково обґрунтованих методів розрахунку та конструювання вихрових апаратів.

Розроблена теоретична методика розрахунку ефективності процесу масоперенесення в робочій зоні порожнистих вихрових апаратів. Експериментально визначено гідравлічний опір і бризковинесення в апараті при зміні співвідношення навантажень за фазами.

Розроблені методика визначення масообмінних характеристик ВРПМА у процесі десорбції  $\text{CO}_2$  в потік повітря, а також рекомендації для аналізу характеристик та ефективності роботи ВРПМА у процесах десорбції (абсорбції) і ректифікації.

Визначена критеріальна залежність для знаходження масообмінних характеристик ВРПМА і розраховані її коефіцієнти на базі проведених експериментальних досліджень. Визначено шляхи підвищення ефективності масообміну у ВРПМА і запропоновано напрямки розвитку й удосконалення нових конструкцій ВРПМА.

Удосконалено інженерну методику проектування і розрахунку основних геометричних параметрів масообмінних камер ВРПМА і масообмінних характеристик двофазного вихрового потоку в апараті.

Наведено результати дослідження ефективності роботи вихрового розпилювального протитечійного масообмінного апарата при абсорбції аміаку. Визначено основні джерела викидів аміаку у виробництві кальцинованої соди і недоліки існуючих промислових апаратів. Був розроблений і запропонований модернізований апарат для санітарного промивання технологічних газів. Досліджена робота модернізованого апарата для санітарного промивання технологічних газів і наведені графічні залежності характеристик роботи апарата.

Ефективність нового апарата значно вища, ніж ефективність існуючого на підприємстві санітарного промивача. У всьому діапазоні зміни кожного із факторів коефіцієнт корисної дії вихрового апарата досить високий і досягає 99 %.

Розроблені технологічні схеми з використанням ВРПМА для очищення промислових газових викидів. Показано, що ефективність розроблених вихрових апаратів під час очищення газових викидів може досягати 99 %.

**Ключові слова:** *вихровий розпилювальний протитечійний масообмінний апарат, гідродинаміка, масообмін, вихровий двофазний потік, абсорбція аміаку.*

## АННОТАЦИЯ

**Аль Хайят Мохаммед Н. К. Массообменные характеристики вихревых противоточных аппаратов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет, МОН Украины, Сумы, 2015.

Целью диссертационной работы являются теоретическое и экспериментальное исследования процесса массообмена в полых противоточных вихревых аппаратах, определение влияния гидродинамических, конструктивных и технологических параметров на эффективность массообменных процессов в вихревой массообменной камере ВРПМА в режиме противоточного движения фаз и создание на их основе научно обоснованных методов расчета и конструирования вихревых аппаратов.

Разработана теоретическая методика расчета эффективности процесса массопереноса в рабочей зоне полых вихревых аппаратов с учетом основных закономерностей массопередачи через поверхность взвешенных капель и пристенной жидкостной пленки.

Экспериментально определено гидравлическое сопротивление аппарата для различных соотношений нагрузок по фазам и начальных скоростей газа в аппарате. Экспериментально определен брызгоунос в аппарате при изменении соотношения нагрузок по фазам.

Разработана методика определения массообменных характеристик ВРПМА в процессе десорбции  $\text{CO}_2$  в поток воздуха. Проведен анализ работы ВРПМА в условиях ректификации в режиме бесконечной флегмы. Разработаны рекомендации для анализа характеристик и эффективности работы ВРПМА в процессах десорбции (абсорбции) и ректификации.

Определена критериальная зависимость для нахождения массообменных характеристик ВРПМА и рассчитаны ее коэффициенты на базе проведенных экспериментальных исследований. Проведено сравнение эффективности ВРПМА с другими конструкциями оборудования для проведения массообменных процессов.

Определены пути повышения эффективности массообмена в ВРПМА и предложены направления развития и усовершенствования новых конструкций ВРПМА.

Усовершенствована инженерная методика проектирования и расчета основных геометрических параметров массообменной камеры ВРПМА и массообменных характеристик двухфазного вихревого потока в аппарате.

Приведены результаты исследования эффективности работы вихревого распыливающего противоточного массообменного аппарата

при абсорбции аммиака. Определены основные источники выбросов аммиака в производстве кальцинированной соды и недостатки существующих промышленных аппаратов. Проведенный анализ конструкций массообменного оборудования, появляющегося в последние годы, позволил выделить одно из направлений развития массообменной техники – распыливающие аппараты, течение в которых характеризуется высокой степенью турбулентности. Высокие скорости газа (пара) позволяют также производить распыливание жидкости на капли малого размера и значительно ускорять процесс массопередачи благодаря увеличению межфазной поверхности. Был разработан и предложен модернизированный аппарат для санитарной промывки технологических газов. Показано, что минимальным брызгоуносом по жидкости обладают вихревые аппараты с распылителями жидкости определенной конструкции. Величина брызгоуноса после вихревых устройств значительно меньше величины брызгоуноса после барботажных тарелок. Снижение брызгоуноса приведет к повышению движущей силы процесса массообмена и увеличит степень абсорбции газообразного аммиака. Исследована работа модернизированного аппарата для санитарной промывки технологических газов и приведены графические зависимости характеристик работы аппарата.

Результаты исследования абсорбера санитарной очистки от газообразного аммиака показали, что он устойчиво работает в широком диапазоне изменения нагрузок аппарата по фазам. Эффективность нового аппарата значительно выше эффективности существующего на предприятии санитарного промывателя. Во всем диапазоне изменения каждого из факторов коэффициент полезного действия вихревого аппарата довольно высок и достигает более 99 %.

Также разработаны технологические схемы с использованием ВРПМА для очистки промышленных газовых выбросов от паров органических растворителей, паров аммиака, сернистого ангидрида, окислов азота, двуокиси углерода. Показано, что эффективность разработанных вихревых аппаратов при очистке газовых выбросов от указанных компонентов может достигать 99 %.

**Ключевые слова:** *вихревой распыливающий противоточный массообменный аппарат, гидродинамика, массообмен, вихревой двухфазный поток, абсорбция аммиака.*

## ABSTRACT

**Al Hayat Mohammed N. K. Mass transfer characteristics of vortex counterflow devices. – Manuscript.**

The Dissertation for a Candidate Degree in Engineering Sciences: specialty 05.17.08 – Processes And Equipment of Chemical Technology. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The aim of the dissertation is a theoretical and experimental study of the processes of heat and mass transfer in counterflow vortex devices, determination of the influence of hydrodynamic, structural and technological parameters on the efficiency of mass transfer processes in counterflow mass transfer chamber VSCMA mode countercurrent movement phases and creation on their basis of scientifically-based methods of calculation and design of vortex devices.

We developed a theoretical method of calculating the efficiency of mass transfer in the working area of the counterflow vortex devices. Experimentally determined hydraulic resistance and the ablation fluid in the apparatus when the change of the ratio of the loads on the phases.

Developed method of determination of mass transfer characteristics VSCMA in the process of desorption of  $\text{CO}_2$  in the air stream. The recommendations were developed to analyze the characteristics and performance VSCMA in the desorption processes (adsorption and rectification).

Defined criteria dependence for finding the mass transfer characteristics VSCMA and its coefficients are calculated on the basis of experimental studies. Identify ways to improve the efficiency of mass transfer in VSCMA and directions of development and improvement of new designs VSCMA.

Improved engineering technique design and calculation of geometrical parameters of mass transfer chambers VSCMA and mass transfer characteristics of two-phase swirling flow in the apparatus.

The results of research into the performance of vortex spray counterflow mass transfer apparatus for the absorption of ammonia. Identifies the main sources of ammonia emissions in the production of soda ash and weaknesses of existing industrial units. Was developed and a modified apparatus for sanitary flushing process gases. The operation of the upgraded apparatus for sanitary flushing process gases and provides a graphical dependence of the performance of the device. The effectiveness of the new device is much higher than the efficiency of an existing enterprise sanitary washer. In the whole range of variation of each of the factors, the efficiency of the vortex of the apparatus is high and reaches 99%.

Developed technological scheme using VSCMA for the treatment of industrial gas emissions. It is shown that the effectiveness of the developed vortex devices when cleaning gas emissions can reach 99 %.

**Key words:** *vortex counterflow spray mass transfer apparatus, hydrodynamics, mass transfer, two-phase turbulent flow, the absorption of ammonia.*

Підписано до друку 15.10.2015.  
Формат 60х90/16. Ум. друк. арк. 1,2. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 928.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.